

УДК 539.4 (075)

В. И. Добровольский, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
С. В. Добровольский, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
Д. С. Добровольский, студент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ПРИМЕНЕНИЕ ПЭВМ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Повышение качества подготовки бакалавров, инженеров и магистров, обладающих глубокими фундаментальными знаниями, умениями и навыками, имеет непреходящее значение. Существенная роль в этом принадлежит курсу «Сопротивление материалов», который является фундаментом для технических дисциплин конструкторского, технологического и эксплуатационного профилей. Вместе с тем в последнее время число часов, отводимых на изучение науки о прочности, существенно сократилось. При этом учебники и учебные пособия центральных издательств содержат до 800 и более страниц, написаны разрозненными авторскими коллективами, отличаются методикой изложения и структурой формул, что существенно затрудняет восприятие материала студентами. В связи с этим создано и передано библиотеке приемлемое по объему системное учебно-методическое обеспечение курса «Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности», включающее содержащие 20 глав учебники [1, 2], учебные пособия по 12 расчетно-проектировочным и 9 учебно-исследовательским работам студентов [3, 4], учебно-методические пособия [5, 6] по 15 лабораторным работам. В результате этого существенно улучшилось качество преподавания и организации учебного процесса, повысилась успеваемость, до 20 % студентов оформляют отчеты по расчетно-проектировочным и лабораторным работам на английском языке.

Важная роль в приобретении студентами технического вуза умений и практических навыков принадлежит лабораторным работам по механическим испытаниям материалов и элементов конструкций. Лабораторный практикум включает 15 занятий по традиционной (оценка прочности, пластичности, упругости материалов и др.) и инновационной (трещиностойкость, тонкостенные стержни, концентрация напряжений, конструкционная пластичность материалов) тематике. В инженерной практике при механических испытаниях материалов и элементов конструкций широко используется вычислительная техника, а результаты испытаний представляются, как правило, в статистическом виде [7]. В указанном направлении следует организовывать проведение

лабораторного практикума. В связи с этим проведена модернизация двух следующих лабораторных работ.

Определение положения центра изгиба тонкостенного стержня открытого профиля

Тонкостенные стержни открытого и закрытого профилей широко используются на практике для снижения материалоемкости инженерных конструкций. Вместе с тем существенным недостатком стержней открытого профиля (двутавр, швеллер, уголок и др.) является то, что они обладают пониженной жесткостью при кручении по сравнению со стержнями закрытого профиля. Для нейтрализации указанного недостатка изгибающие нагрузки следует прикладывать не в центре тяжести, а в центре изгиба сечения стержня. Это необходимо учитывать при конструировании, изготовлении и эксплуатации конструкций, содержащих тонкостенные стержни открытого профиля.

В лабораторной работе рассматривается тонкостенный стержень незамкнутого кольцевого сечения со средним радиусом $R = 28,7$ мм. Исходя из теоретических положений, расстояние от центра тяжести сечения до центра изгиба $a_x = 2R = 57,4$ мм. Экспериментальное определение положения центра изгиба проводится на современной лабораторной установке [8, 9]. При проведении опыта последовательно записываются (см. табл.) показания левого $U_{ли}$ и правого $U_{пи}$ индикаторов часового типа в зависимости от абсциссы X_i точки приложения изгибающей силы. Результаты опыта представлены для наглядности на рис. 1. Видно, что опытные данные в нарушение закона Р. Гука имеют некоторое рассеивание, обусловленное случайными и систематическими погрешностями.

Следовательно, они обладают признаками случайных величин и должны подвергаться статистической обработке. В связи с этим для модернизации лабораторной работы Д. С. Добровольским создана учебная программа для кафедрального класса ПЭВМ для статистической обработки опытных данных по методу наименьших квадратов [10] на основе системы Mathcad. Для этого уравнения прямых (рис. 1) для левого и правого индикаторов представлены следующим образом:

$$\bar{U}_л = \bar{m}_л X + \bar{U}_{л0}; \quad \bar{U}_п = \bar{m}_п X + \bar{U}_{п0},$$

где $\bar{m}_л$, $\bar{U}_{л0}$, $\bar{m}_п$, $\bar{U}_{п0}$ – искомые статистические параметры.

Результаты опыта при определении положения центра изгиба

№ п/п	X_i , мм	ΔX_i , мм	$U_{ли}$, дел.	$\Delta U_{ли}$, дел.	$U_{пи}$, дел.	$\Delta U_{пи}$, дел.
0	0	–	60	–	1	–
1	5	5	55	–5	2	1
2	10	5	50	–5	3	1
3	15	5	48	–2	5	2
4	20	5	46	–2	8	3
5	25	5	41	–5	9	1
6	30	5	37	–4	10	1
7	35	5	33	–4	11	1
8	40	5	28	–5	12	1
9	45	5	25	–3	14	2
10	50	5	23	–2	17	3
11	55	5	19	–4	18	1
12	60	5	14	–5	19	1

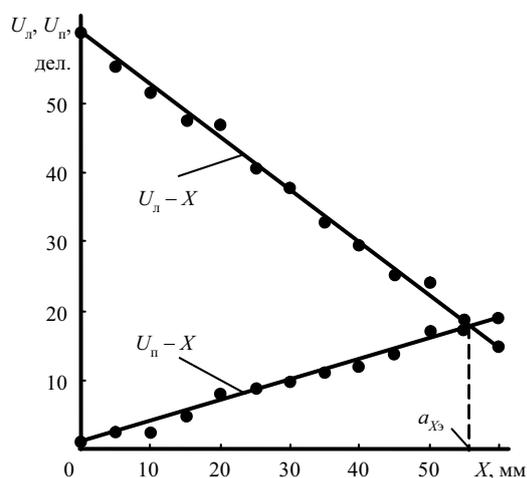


Рис. 1. Показания левого $U_{ли}$ и правого $U_{пи}$ индикаторов часового типа в зависимости от абсциссы X_i точки приложения изгибающей силы

Рассмотрим пример использования программы с учетом данных таблицы.

1. Среднее значение абсциссы точки приложения силы, показаний левого и правого индикаторов:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{i} = 30,0 \text{ мм}; \quad \bar{U}_л = \frac{\sum U_{ли}}{i} = 36,8 \text{ дел.};$$

$$\bar{U}_п = \frac{\sum U_{пи}}{i} = 9,92 \text{ дел.}$$

2. Средние квадратические отклонения X , $U_л$ и $U_п$ при числе опытов $i = 13$:

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{i} \sum X_i^2 - \bar{X}^2} = 18,7 \text{ мм};$$

$$\sigma_{U_л} = \sqrt{\frac{1}{i} \sum U_{ли}^2 - \bar{U}_л^2} = 13,9 \text{ дел.};$$

$$\sigma_{U_п} = \sqrt{\frac{1}{i} \sum U_{пи}^2 - \bar{U}_п^2} = 5,81 \text{ дел.}$$

3. Смешанные центральные моменты первого порядка:

$$\mu_{лл} = \frac{1}{i} \sum X_i \cdot U_{ли} - \bar{X} \cdot \bar{U}_л = -260 \text{ мм} \cdot \text{дел.};$$

$$\mu_{пп} = \frac{1}{i} \sum X_i \cdot U_{пи} - \bar{X} \cdot \bar{U}_п = 108 \text{ мм} \cdot \text{дел.}$$

4. Тангенсы углов наклона прямых для левого и правого индикаторов:

$$\bar{m}_л = \frac{\mu_{лл}}{\sigma_X^2} = -0,744 \frac{\text{дел.}}{\text{мм}}; \quad \bar{m}_п = \frac{\mu_{пп}}{\sigma_X^2} = 0,309 \frac{\text{дел.}}{\text{мм}}.$$

5. Отрезки, отсекаемые прямыми $U_л - X$, $U_п - X$ на оси ординат:

$$\bar{U}_{л0} = \bar{U}_л - \bar{m}_л \cdot \bar{X} = 59,2 \text{ дел.};$$

$$\bar{U}_{п0} = \bar{U}_п - \bar{m}_п \cdot \bar{X} = 0,659 \text{ дел.}$$

6. Коэффициенты корреляции опытных данных для левого и правого индикаторов:

$$r_л = \left| \frac{\mu_{лл}}{\sigma_X \cdot \sigma_{U_л}} \right| = 0,998; \quad r_п = \frac{\mu_{пп}}{\sigma_X \cdot \sigma_{U_п}} = 0,994.$$

7. Абсцисса центра изгиба после статобработки опытных данных:

$$\bar{a}_{X_3} = (\bar{U}_{л0} - \bar{U}_{п0}) / (\bar{m}_п - \bar{m}_л) = 55,6 \text{ мм.}$$

8. Отклонения результатов расчета от опытных данных:

$$\delta = 100(a_X - \bar{a}_{X_3}) / \bar{a}_{X_3} = 3,3 \text{ \%}.$$

Анализ концентрации напряжений при растяжении элемента конструкции

Разрушение элементов конструкций происходит, как правило, в местах концентрации (увеличения) напряжений. Первая работа по аналитическому определению концентрации напряжений при растяжении пластины с круговым отверстием выполнена в 1898 г. немецким механиком Г. Киршем. В 1909 г. Г. В. Колосов решил задачу о концентрации напряжений в пластине с эллиптическим отверстием. Вместе с тем аналитические решения задач о концентрации напряжений для широкого разнообразия форм и условий нагружения элементов конструкций нередко вызывают непреодолимые математические трудности. В связи с этим на практике получили распространение трудоемкие и сложные в методическом отношении экспериментальные методы (поляризационно-оптический, тензометрический, оптически активных покрытий, сеток, муаровых полос), использование которых в лабораторных работах сдерживается отсутствием на кафедре соответствующего оборудования. В последнее время при ис-

следовании концентрации напряжений широко используются машинные методы (конечных элементов [11], граничных элементов и др.). Однако их использование в лабораторных работах затруднено острым недостатком часов, выделяемых на изучение науки о прочности.

При выполнении лабораторной работы используются громоздкие решения Г. Нейбера [12], полученные методами теории упругости в гиперболических координатах. Рассматривается концентрация напряжений при растяжении стержня с кольцевым надрезом, моделирующим работу материала в резьбовых участках или резких переходах диаметров элементов конструкций. Распределение коэффициентов концентрации $\alpha_{1\nu}$, $\alpha_{2\nu}$, $\alpha_{3\nu}$ главных напряжений по опасному сечению описывается формулами [13]

$$\begin{aligned}\alpha_{1\nu} &= \sigma_{1m\nu} / \sigma_H = K / \cos \nu + (D + C \cos^2 \nu) / \cos^3 \nu, \\ \alpha_{2\nu} &= \sigma_{2m\nu} / \sigma_H = [A / (1 + \cos \nu) - B + Z] / \cos \nu, \\ \alpha_{3\nu} &= \sigma_{3m\nu} / \sigma_H = \\ &= [E - A / (1 + \cos \nu)] / \cos \nu + (F - C \cos^2 \nu) / \cos^3 \nu,\end{aligned}\quad (1)$$

где $\sigma_{1m\nu}$, $\sigma_{2m\nu}$, $\sigma_{3m\nu}$ – главные местные напряжения в точке с гиперболической координатой $\nu = \arcsin[(x/a) \sin \nu_0]$; x/a – относительные координаты рассматриваемой точки; $\sigma_H = N_z / (\pi a^2)$ – номинальное напряжение. Входящие в формулы (1) параметры определяются с учетом характеристики a/ρ (рис. 2) кольцевого надреза:

$$\begin{aligned}\nu_0 &= \arctg \sqrt{a/\rho}; \quad \alpha = 1,40; \\ C &= -0,5(1 - \cos \nu_0) / [1 + (2 - \alpha) \cos \nu_0 + \cos^2 \nu_0]; \\ A &= (\alpha - 1)(1 + \cos \nu_0)C; \quad B = A - C \cos^2 \nu_0; \\ D &= B - A; \quad E = (\alpha - 1)C; \quad F = A - B; \\ K &= B - (1 + \alpha)C; \quad Z = (\alpha - 2)C.\end{aligned}\quad (2)$$

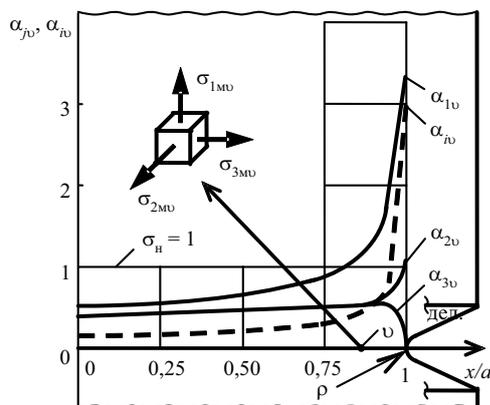


Рис. 2. Распределение теоретических коэффициентов концентрации $\alpha_{1\nu}$, $\alpha_{2\nu}$, $\alpha_{3\nu}$ главных напряжений и интенсивности напряжений $\alpha_{i\nu}$ в опасном сечении при растяжении стержня

В зонах концентрации местное напряженное состояние является объемным. Для учета этого в расчетах на прочность используется также коэффициент концентрации интенсивности главных напряжений

$$\begin{aligned}\alpha_{i\nu} &= \sigma_{im\nu} / \sigma_{in} = \\ &= \sqrt{\alpha_{1\nu}^2 + \alpha_{2\nu}^2 + \alpha_{3\nu}^2 - \alpha_{1\nu}\alpha_{2\nu} - \alpha_{2\nu}\alpha_{3\nu} - \alpha_{3\nu}\alpha_{1\nu}}.\end{aligned}\quad (3)$$

При использовании студентами калькуляторов для вычисления коэффициентов концентрации затрачивается много времени. В связи с этим с целью сокращения трудоемкости при выполнении лабораторной работы Д. С. Добровольским составлена учебная программа для кафедрального класса ПЭВМ в системе Mathcad с целью определения коэффициентов концентрации главных напряжений и их интенсивности при растяжении стержня с кольцевым надрезом. Результаты применения программы рассмотрим для кольцевого надреза при $a/\rho = 10$ (рис. 2).

1. Параметры формул (1): $\nu_0 = 1,26$; $\alpha = 1,40$; $C = -0,512$; $A = -0,266$; $B = -0,220$; $D = 0,0465$; $E = -0,205$; $F = -0,0465$; $K = 1,01$; $Z = 0,307$.

2. Для вершины надреза $x/a = 1$, $\nu = 1,26$: $\alpha_1 = 3,34$; $\alpha_2 = 1,07$; $\alpha_3 = 0$; $\alpha_i = 2,96$.

3. Для $x/a = 0,95$, $\nu = 1,13$: $\alpha_1 = 1,78$; $\alpha_2 = 0,802$; $\alpha_3 = 0,555$; $\alpha_i = 1,13$.

4. Для $x/a = 0,75$, $\nu = 0,797$: $\alpha_1 = 0,847$; $\alpha_2 = 0,529$; $\alpha_3 = 0,527$; $\alpha_i = 0,318$.

5. Для $x/a = 0$, $\nu = 0$: $\alpha_1 = 0,543$; $\alpha_2 = 0,394$; $\alpha_3 = 0,394$; $\alpha_i = 0,149$.

По полученным результатам строятся графики изменения коэффициентов концентрации $\alpha_{j\nu}$ ($j = 1; 2; 3$) главных напряжений $\sigma_{j\nu}$ и их интенсивности $\alpha_{i\nu}$ в опасном сечении стержня при растяжении (рис. 2).

Таким образом, модернизация лабораторных работ путем применения ПЭВМ позволяет приблизить методику их проведения к инженерной практике, сокращает трудоемкость выполнения, побуждает студентов использовать вычислительную технику при механических испытаниях материалов и элементов конструкций.

Библиографические ссылки

1. Добровольский В. И., Добровольский С. В. Сопротивление материалов : учебник. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2011. – 404 с.

2. Dobrovolsky V. I., Dobrovolsky S. V. Mechanics of Materials: textbook. – Izhevsk : Publishing House of ISTU, 2012. – 408 p.

3. Добровольский В. И., Добровольский С. В. Оценка прочности, жесткости и устойчивости элементов конструкций: учеб. пособие. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2008. – 324 с.

4. Dobrovolsky V. I., Dobrovolsky S. V. Strength, rigidity and stability analyses of constructions elements: tutorial. – Izhevsk : Publishing House of ISTU, 2013. – 324 p.

5. Добровольский В. И., Добровольский С. В. Механические испытания материалов : учеб.-метод. пособие. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2008. – 268 с.

6. Dobrovolsky V. I., Dobrovolsky S. V. Mechanical Tests of Materials: study guide. – Izhevsk : Publishing House of ISTU, 2013. – 268 p.

7. Стеннов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.

8. Добровольский В. И., Добровольский С. В. Механические испытания материалов : учеб.-метод. пособие.

9. Dobrovolsky V. I., Dobrovolsky S. V. Mechanical Tests of Materials: study guide.

Получено 12.01.15

10. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. – М. : Физматгиз, 1961. – 356 с.

11. Добровольский С. В., Шакиров Р. Ф., Добровольский В. И. Результаты конечноэлементного анализа напряжений в зонах концентрации деталей гидрооснастки // Вестник машиностроения. – 1999. – № 1. – С. 11–14.

12. Нейбер Г. Концентрация напряжений. – М. ; Л. : Гостехиздат, 1947. – 204 с.

13. Там же.

УДК 621.77; 623.52

В. Е. Останин, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
С. А. Алексеев, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ В ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

Ручное оборудование для резки бетона и других твердых материалов, обладающее свойствами мобильности и автономности, актуально во многих сферах деятельности человека. Такое оборудование, действующее по принципу пескоструйной резки, может быть создано на базе образца автоматического стрелкового оружия при использовании специальных или штатных холостых патронов без имитатора пули.

Важным этапом на стадии эскизного проектирования является анализ возможности достижения характеристик, определяющих эффективность функционирования инструмента, в частности скорости абразивной смеси, при максимальной его унификации со штатным образцом стрелкового оружия. Результатам такого анализа при использовании в качестве базового образца автомата АК-103 и штатного холостого патрона 57-Х-231 посвящена данная статья.

Анализ проводился для двух вариантов исполнения инструмента: 1) штатный образец автомата с дульной втулкой для холостой стрельбы; подвод абразивной смеси в канал ствола предполагался в сечении, отстоящим от казенного среза на 250 мм; 2) образец автомата с укороченным стволом и дополнительным дульным сопловым насадком при том же патроне и условиях подвода абразивной смеси.

При математическом моделировании приняты следующие допущения.

1. Абразивная смесь состоит из двух фаз: газопороховой смеси (ГПС) и твердой фазы – кварцевого песка.

2. Термодинамическая постановка задачи для определения параметров газа.

3. Двухскоростная модель течения смеси в стволе и сопловом насадке. Твердая фаза не влияет на течение газа в канале. Движение твердой фазы моделируется движением одной твердой частицы.

4. Изэнтропичность течения газа в сопловом насадке.

5. Квазистационарность течения в сопловом насадке.

6. Газ идеальный.

Математическая модель движения твердой частицы в цилиндрическом канале

Рассмотрим математическую модель, описывающую динамику движения твердой частицы в потоке порохового газа в цилиндрическом канале.

При рассмотрении процесса приняты следующие дополнительные допущения.

1. В холостом патроне отсутствует имитатор пули, а роль пули выполняет переменная масса воздуха, вытесняемого из ствола. Влияние движения воздуха на твердую частицу, находящуюся в стволе, не учитывается.

2. Частица, расположенная в стволе на расстоянии $X_{т0}$ от дна канала, начинает движение с момента прихода к ней границы раздела ГПС – воздух. Скорость движения частицы V_T в силу ее инертности меньше скорости течения газа V_G .

3. Принята термодинамическая модель внутренней баллистики с допущением о равномерной плотности газа по длине заснарядного пространства [1].

При данном допущении аналитические зависимости для скорости V_x и давления p_x в сечении x , также средней плотности ρ_T порохового газа имеют вид

$$V_x = V \frac{x}{l}; \quad (1)$$

$$p_x = p_{кн} - (p_{кн} - p_l) \frac{x^2}{l^2}; \quad (2)$$

$$\rho_T = \frac{\omega \Psi}{Sl}; \quad (3)$$

$$l = l_0 + l_d,$$